发展性阅读障碍书写加工缺陷及其神经机制

卫垌圻[1，2]，曹慧[3]，毕鸿燕[1,2,4]，杨炀[1,2,4**]

1 中国科学院行为科学重点实验室，中国科学院心理研究所

2 脑科学与学习困难研究中心，中国科学院心理研究所

3 北京教育学院

4 中国科学院大学

摘要

发展性阅读障碍是学习障碍的主要类型之一，严重影响个体认知、情感与社会适应性的发展。书写与阅读关系密切，阅读障碍者常常表现出书写加工缺陷。在行为层面，阅读障碍者书写缺陷表现在书写质量差、速度慢和停顿多等多个方面。在脑机制层面，脑成像研究发现，阅读障碍者书写加工缺陷与字形加工脑区活动，以及字形与运动区脑功能与结构连接异常有关。总体而言，阅读障碍在书写过程中的字形通达缺陷的证据比较充分，但字形与运动编码的衔接以及运动执行是否存在困难，尚缺乏研究证据。相对于字母语言，书写与阅读的关系在汉语中更为紧密，汉语阅读障碍的书写研究将为开发汉语特色的诊治方案提供重要指导。

关键词 发展性阅读障碍；汉语；书写；脑机制

阅读是人类信息交流与知识获取的重要途径，对个体生存与发展起着重要作用。然而，一部分个体却因为受到阅读障碍的困扰而无法正常阅读。发展性阅读障碍（developmental dyslexia）是指智力正常，并享有平等教育条件，且无明显神经与器质性病变的个体，但其阅读水平却低于其年级（年龄）应有水平的一种学习障碍。阅读障碍是一种具有神经生物学基础的发展障碍，不仅制约个体的知识获取与学业成就发展，还对个体的情绪、行为与社会适应性发展等方面造成严重的负面影响。据统计，拼音文字阅读障碍发生率约为 5-17.5% (Shaywitz, 1998)。根据低成就定义法，即落后年级平均阅读水平两个标准差，则汉语阅读障碍发生率为 4.55%。而根据不一致定义法，即阅读成绩低于全体成绩分布低端 10%的分数点，并且低于按其智商预期的阅读成绩两个标准差，则汉语阅读障碍发生率为 7.96% (张承芬, 张景焕, 殷荣生, 周静, & 常淑敏, 1996)。近期一项在山东济宁、北京与广州开展的调查结果却显示，3 至 5 年级汉语儿童阅读障碍的发生率总体达到了 28.15% (Tan, Xu, Chang, & Siok, 2013)，表明汉语阅读障碍发生率有大幅上升的趋势。不同研究报告的阅读障碍发生率存在差异，一方面可能与测试内容有关。不同的测试内容可能检测出不同的发生率。另外一方面，不同的诊断标准也会得到不同的发生率。张承芬等（1996）采用的低成就定义与不一致定义就报告了不同的发生率。最后，阅读障碍的发生率可能还受到测试样本特征的影响。例如，Tan 等（2013）指出，汉语阅读障碍发生率大幅上升，可能与数字时代电子的产品使用有关，大量使用拼音输入法有可能导致阅读困难发生率上升。因此，阅读障碍致病机制及矫正研究一直是心理学、教育学、神经科学等多个领域的热点研究问题之一。

关于阅读障碍的成因，有以下几种不同的观点：1）语音缺陷理论认为，语音解码和操纵能力缺陷是导致阅读障碍阅读困难的核心因素(Goswami, 2011)；2）一般感知觉缺陷理论认为，语言层面缺陷只是外在表现，更基本的感知觉加工缺陷才是导致阅读障碍的真实原因。例如，视觉大细胞理论认为，阅读障碍的视觉大细胞功能缺陷影响阅读过程中眼动控制与视知觉加工，从而造成阅读过程中的视觉加工困难 (Stein, Richardson, & Fowler, 2000)；3）小脑缺陷理论则直接从脑机制的角度解释了阅读障碍成因，认为小脑功能失调影响了运动技能或自动化水平，进一步导致发音技能与拼写等多方面的加工困难，最终影响阅

读 (Nicolson, Fawcett, & Dean, 2001)。

研究发现，阅读障碍者不仅仅表现出阅读困难，还普遍存在书写或拼写的问题 (Berninger, Nielsen, Abbott, Wijsman, & Raskind, 2008; Kalindi et al., 2015; Kandel, Lassus-Sangosse, Grosjacques, & Perret, 2017; Lam, Au, Leung, & Li-Tsang, 2011; Martlew, 1992; McBride-Chang, Chung, & Tong, 2011; Sumner, Connelly, & Barnett, 2013; E Sumner, V Connelly, & A. L. Barnett, 2014)，而且，有相当比例的阅读障碍甚至达到了书写障碍的诊断标准 (Nicolson & Fawcett, 2011)。根据小脑理论，小脑缺陷可能通过影响运动或自动化加工能力而导致书写缺陷。而书写的语音中介理论则认为，书写产生过程中，语音起到连接语义与字形的中介作用 (Bonin, Peereman, & Fayol, 2001)。那么，阅读障碍的书写问题可能也与阅读障碍的语音缺陷相关。因此，对阅读障碍书写问题的研究有助于探究阅读障碍致病机制，进而形成相应的矫治方案，应得到足够的重视 (Berninger et al., 2008)。

1.书写对阅读的影响

书写涉及一系列复杂的语言、认知与运动加工活动。广义上，书写可以分为中央过程与外周过程两个部分 (Purcell, Turkeltaub, Eden, & Rapp, 2011)。其中，中央过程主要负责提取字形信息，涉及词条选择、字形与图像表征提取等加工。中央过程的字形通达包括词汇与亚词汇两条通路。词汇通路指直接从长时记忆表征中提取整词，作用在熟悉词的加工。而亚词汇通路指基于形-音对应规则，首先提取音素，然后激活相应的字形信息，作用在假词或低频词的加工 (Afonso, Suárez-Coalla, & Cuetos, 2015)。外周过程负责书写运动加工，涉及字形运动编码与执行。脑成像研究发现，书写涉及大脑多个脑区，包括前额运动区、后顶叶、颞下回后部（梭状回）以及小脑。其中，左侧颞下回后部、额上回与额下回/沟负责中央过程的字形提取 (Planton, Jucla, Roux, & Démonet, 2013; Purcell et al., 2011)，而左侧额中回、顶内沟/顶上小叶与小脑负责书写外周运动加工 (Planton et al., 2013)。

书写与阅读的关系密切。从加工过程的角度分析，书写与阅读是两个互逆的过程，涉及多个共同的加工成分。阅读涉及从视觉词形输入到语言理解过程，而书写涉及从语义信息提取到视觉词形输出的过程 (王成, 尤文平, 张清芳,

2012)。相关研究发现，词语书写的准确性与词汇判断（Burt & Tate, 2002）和字形判断（Holmes & Carruthers, 1998）的成绩显著相关。而且，书写与阅读成绩的相关在小学不同年级都存在 (Abbott, Berninger, & Fayol, 2010)。训练研究进一步发现，相比打字或视觉呈现的方式，书写练习能够获得更好的获得阅读能力 (Cao et al., 2013; Longcamp, Zerbato-Poudou, & Velay, 2005)。一种可能是，书写与阅读涉及相同或类似的正字法加工过程。因此，书写练习能够帮助建立高质量的正字法表征，从而促进阅读过程中的正字法识别。正常人的脑成像研究支持了这一观点 (Rapp & Lipka, 2011)。例如，功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)研究发现，同一组被试完成书写与阅读任务时，视觉词形区（Visual Word Form Area, VWFA）存在大量的共同激活 (Purcell, Jiang, & Eden, 2017; Rapp & Lipka, 2011)。但是，脑损伤病人的研究却发现，VWFA 的不同部位分别对应阅读与书写加工，表明阅读与书写的字形加工脑区可能是分离的 (Baldo et al., 2018; Purcell, Shea, & Rapp, 2014)。因此，正字法表征在书写与阅读中的重合与分离，有待进一步深入研究。另一种观点认为，书写练习能够形成文字的运动记忆与表征，从而促进视觉文字的识别。也有脑成像研究的发现支持这一假设。在字母识别过程中，书写相关的运动功能区也表现出显著地激活(Nakamura et al., 2012)。近期一项采用经颅磁刺激（Transcranial Magnetic Stimulation）技术的研究发现，干扰前运动区增加了对印刷体与手写体词汇判断的反应时，说明运动区激活在词汇视觉识别过程中起着必要的作用。该研究从因果关系的角度证实了书写的脑功能区在阅读加工中的作用 (Pattamadilok, Ponz, Planton, & Bonnard, 2016)。

基于书写与阅读的内在联系，在不同的文字系统中，研究者开展了针对阅读障碍者书写加工缺陷的研究，试图从字形输出这一角度来理解阅读障碍的成因，并开发对应的矫正方案。

2. 拼音文字阅读障碍的书写加工研究

2.1 行为研究

2.1.1 儿童阅读障碍研究

一项针对英语阅读障碍儿童的早期研究发现，相比同年龄控制组儿童，阅读障碍儿童在词语听写与句子抄写中的拼写错误率更高，书写质量更差。与同

拼写水平控制组相比，阅读障碍儿童抄写复杂词语的速度更慢。这表明，阅读障碍的书写困难是一种与阅读障碍本身相关的能力缺陷，而不仅仅是书写能力发展滞后导致的 (Martlewm, 1992)。后续一项研究采用字母命名、词语听写与书写作文测验等不同水平的加工任务，揭示出阅读障碍儿童书写能力发展明显不足。其中，字母书写流畅性低于同年龄段水平 1.1 个标准差，词语听写低于 1.03 个标准差，而书写作文低于 1 个标准差。回归分析进一步发现，言语流畅性与抑制能力是预测阅读障碍儿童字母命名成绩的独立变量，而一般性的序列运动加工能力不能独立预测阅读障碍儿童的书写作文成绩。这说明，阅读障碍的书写缺陷不是由基本的手指运动加工缺陷所导致 (Berninger et al., 2008)。尽管该研究排除了手指运动等低水平因素，但是其采用的听写与抄写任务涉及了字形通达、字形-运动转换与运动执行等多个加工成分。阅读障碍儿童书写加工缺陷发生在哪个部分，尚不清楚。

随着数字写字板的引入，使得我们对阅读障碍书写加工过程的考察变得更加深入。除了书写运动时间和质量等指标，还可以考察潜伏期、运动速率、持续时间与停顿间歇等多个指标。例如，Sumner 等（2013）比较了英文阅读障碍儿童与同年龄和同拼写水平控制组儿童在字母书写与书写作文上的成绩。字母书写任务中，要求儿童按照字母表顺序连续写出英文字母，时间限制 1 分钟。在书写作文任务中，要求儿童按照提示的主题写出一篇短文，时间限制 15 分钟。此外，还测试了三组儿童精细运动能力。结果发现，阅读障碍儿童在字母书写与书写作文的过程中比同年龄控制组停顿次数更多，且时间更长，但与同拼写水平控制组无统计差异。此外，三组儿童在单个字母书写速度与手指精细运动方面没有显著差异。这表明，阅读障碍儿童的书写缺陷可能发生在快速通达字形阶段，而不是发生在运动执行阶段 (Sumner et al., 2013)。为控制书写作文中其它认知因素的影响（意图的产生、语段组织与语义加工等），Sumner 等（2014）采用了句子抄写任务考察了英文阅读障碍儿童的书写加工。结果发现，阅读障碍儿童比同年龄控制组书写词汇数量更少，词语内的停顿次数更多，但比同拼写能力组书写的词更多，暂停次数更少。回归分析发现，拼写与书写中的暂停数能够解释阅读障碍儿童书写产生成绩 76%的变异 (Sumner, Connelly, & Barnett, 2014)。此外，Kandel 等 (2017) 采用运动持续时间、潜伏期与回视次数等指标，考察了法语阅读障碍儿童、书写障碍儿童与正常儿童在抄写真词与假

词上的表现。结果发现，阅读障碍儿童与书写障碍儿童比正常儿童表现出更强的正字法规则性效应，即阅读障碍儿童在书写不规则词的成绩比书写规则词的成绩差，而且这种差异比正常儿童更大。此外，在潜伏期与回视次数上，阅读障碍儿童也表现出更强的词频效应，表现为低频字与高频字的差异比正常儿童更大。作者认为，阅读障碍儿童书写运动加工缺陷是由字形与运动整合过程中的认知负荷所导致 (Kandel et al., 2017)。那么，儿童阶段阅读障碍的书写困难会不会随着儿童语言与运动能力的发展而发生变化呢？一项意大利阅读障碍儿童的发展研究考察了这一问题。结果发现，与同年龄控制组儿童相比，三年级的阅读障碍儿童在听写各种类型的词语 (规则词/非词、一致/不一致词) 时都表现出速度慢，错误率高的问题，而五年级阅读障碍儿童书写缺陷只表现在书写不一致词语与语音相似词语中。作者认为，这反映了阅读障碍儿童在不同年龄阶段具有不同形式的正字法通达缺陷：低年级阅读障碍儿童在词汇通路与亚词汇通路都存在困难，而高年级阅读障碍儿童可能只在词汇通路表现出困难 (Angelelli, Notarnicola, Judica, Zoccolotti, & Luzzatti, 2010)。上述研究结果提示，阅读障碍儿童的书写困难可能主要源于中央过程加工中无法快速、准确提取字形信息。

同时，也有研究关注了阅读障碍书写的外周运动缺陷。一项研究比较了意大利阅读障碍儿童（有/无书写障碍）与同年龄控制组儿童在不同运动速度（自然书写 vs. 快速书写）与幅度（字体大 vs. 字体小）条件下的单词抄写成绩。结果发现，在快速与大字体的条件下，阅读障碍儿童比正常儿童书写速度更慢。但是在自然书写状态下，阅读障碍与控制组没有差异。对单个字母书写分析发现，在不同运动条件下，阅读障碍儿童缺乏保持字母书写速度的稳定性，也不能随书写幅度（大/小）的变化适时调整速度。该研究还发现，有无书写障碍的阅读障碍儿童在手指运动方面的表现没有差异 (Pagliarini et al., 2015)。该研究中，字形通达加工负荷在条件间并无差异。这表明，尽管阅读障碍者在一般性手指精细运动方面不存在缺陷，但是可能在书写的外周过程存在特异性的运动加工缺陷。阅读障碍儿童书写运动的不稳定性可能反映出运动节律的异常，与小脑功能缺陷有关(Nicolson et al., 2001)。但目前，这类研究仅此一项，阅读障碍儿童在书写外周过程上的加工缺陷需要进一步考察。

2.1.2 成年阅读障碍研究

随着认知与运动能力的发展成熟，成年阅读障碍者是否还存在书写加工缺陷？具体表现形式如何呢？研究发现，成年阅读障碍者仍不能在规定时间内完成作文任务，会出现大量的拼写错误，词语的数量也低于正常人。而且，这种书写缺陷并不是由写作意图形成、篇章与句子组合等高水平的语言组织加工所导致(Connelly, Campbell, MacLean, & Barnes, 2006; Gregg, Coleman, Davis, & Chalk, 2007)。有研究发现，与同拼写水平控制组相比，成年阅读障碍在书写作文任务中自发产生拼写错误更多(Connelly et al., 2006)。上述研究以篇章作为材料，很难完全排除句法、语义等混淆因素的影响。近期一项研究采用听写与抄写任务，通过操纵一致性、词频与词长等中央过程因素，系统研究了成年阅读障碍在词语水平上的书写加工。结果发现，阅读障碍者在潜伏期、字母间的间隔以及持续时间等方面都比控制组差。这表明，成年阅读障碍者在书写的字形通达仍存在缺陷(Afonso et al., 2015)。成年阅读障碍的研究表明，阅读障碍的书写缺陷并不能随着成熟而自发康复，早期诊断与干预十分必要。

2.1.3 行为研究小结

行为研究发现，从字母、词汇到语篇等多个水平上，不同拼音文字系统中的阅读障碍者都表现出书写加工困难，反映在书写过程（速度、停顿等）与质量等多个方面。同时，尽管阅读障碍儿童与成人都表现出书写缺陷，但不同年龄的行为表现还存在一定差异。高年级儿童与成人阅读障碍者中，词汇通路的书写缺陷可能表现得更为明显(Afonso et al., 2015; Angelelli, Notarnicola, Judica, Zoccolotti, & Luzzatti, 2010)。同时，以往研究发现主要集中在书写的正字法通达方面，明确了字形通达是阅读障碍书写加工缺陷的重要成因。相对而言，对书写外周过程的研究证据还很缺乏，尚难确定阅读障碍者是否存在书写外周过程缺陷。造成这种情况的原因是，一方面，在篇章或句子书写任务中，很难排除句法与语义等因素的影响而分离出外周运动加工成分。因此，阅读障碍者运动方面的异常在较高认知加工负荷任务中可能被掩盖了(Kandel, Lassus-Sangosse, Grosjacques, & Perret, 2017)。另一方面，前人研究中对运动加工的测试多采用独立的运动测试任务 (Connelly, Campbell, MacLean, & Barnes, 2006; Sumner, Connelly, & Barnett, 2013)，而书写中的运动成分可能是一种特异性的运动加工，其它的运动测试无法准确地测量这种特殊的手指运动加工。针对这些

问题的一种解决方法是，采用因素设计的方法，通过对运动因素的操纵来进一步考察阅读障碍书写外周过程缺陷。例如，Pagliarini 等（2015）有针对性地操纵了书写速度与幅度。更重要的是，行为研究采用反应时或准确率等作为量化指标，很难完全分离书写这种连续加工过程中的字形提取与运动过程。近期研究发现，书写的中央与外周过程并不是独立运行，而是存在交互作用 (Kandel & Perret, 2015; Roux, Mckeeff, Grosjacques, Afonso, & Kandel, 2013)。这意味着，书写运动指标可能也包括了中央过程加工成分。后续研究可能需要考虑采用更为敏感的测量方法，比如，利用脑成像技术，从脑机制的层面分离字形和运动成分，进一步明确中央与外周成分在阅读障碍者书写缺陷中的作用。

2.2 阅读障碍书写脑机制研究

书写是一项复杂加工，不同的书写任务涉及不同的加工成分，而阅读障碍的书写加工缺陷可能发生在某个或者某几个加工阶段。行为研究揭示了阅读障碍书写困难的多重表现形式，却很难深入揭示这些行为表现背后的机制。脑成像研究可以从功能定位与网络连接等角度揭示阅读障碍书写缺陷的神经基础。一项脑成像研究考察了英语阅读障碍儿童、书写障碍儿童与正常儿童书写相关的脑功能与结构连接(Richards et al., 2015)。脑功能连接结果显示，在字母书写与拼写任务中，阅读障碍儿童左侧颞-枕区与小脑的功能连接比同年龄控制组儿童更强，表明阅读障碍儿童书写缺陷可能与视觉语言区与运动区连接异常相关。同时，在书写作文任务中，没有发现阅读障碍儿童与控制组有功能连接上的差异，但是发现书写障碍儿童比控制组有更强的功能连接网络，包括：1）左侧颞枕叶与左侧布洛卡区、左侧视觉皮层以及双侧小脑的连接；2）左侧楔前叶与右侧小脑的连接；3）左侧布洛卡区与左侧顶下小叶、左侧视觉皮层以及双侧小脑的连接。此外，扩散张量成像（diffusion tensor imaging）分析发现，阅读障碍儿童与书写障碍儿童白质结构异常模式存在显著差异。这说明，尽管阅读障碍者与其它书写相关障碍的行为表现相似，但阅读障碍书写缺陷具有特异性的神经机制。这一研究首次揭示了阅读障碍者书写加工缺陷的脑机制 (Richards et al., 2015)。然而，受研究技术的限制，直接考察阅读障碍者书写加工脑机制的研究还仅此一项。

目前，尚未有研究针对性地考察阅读障碍者中央与外周过程缺陷的神经机

制。但是，以往研究提示，书写与阅读过程可能涉及相同的字形加工脑机制(Purcell, Jiang, & Eden, 2017)。因此，字形判断任务中的异常脑激活与脑连接模式，也可能间接提示了阅读障碍者书写过程中字形通达缺陷的脑机制(van der Mark et al., 2009; van der Mark et al., 2011)。例如，van der Mark et al., (2009)发现，阅读障碍儿童缺乏视觉词形区（visual word form area, VWFA)从前至后的敏感性梯度变化(Van der Mark et al., 2009)，这提示了阅读障碍者者字形表征特异性的缺陷。该研究还发现，相比与正常儿童，阅读障碍儿童 VWFA 区域与额下回和顶下小叶的连接减弱，这可能是导致阅读障碍者存在字形提取加工缺陷的重要神经基础 (van der Mark et al., 2011)。另一项研究发现，阅读障碍儿童在完成拼写判断任务时，左侧颞-枕区的连接比同年龄控制组儿童更多，反映出阅读障碍儿童无法建立特异性的字形功能连接通路 (Berninger, Richards, & Abbott, 2015)。需要注意的是，尽管拼写判断任务同样涉及到字形提取加工，但是，与真实的书写任务相比，拼写判断任务

需运动输出，字形提取的认知过程可能与真实书写存在较大差异。因此，要明确导致阅读障碍者书写加工困难的具体过程，还需要进一步在真实书写状态下考察阅读障碍书写加工的神经机制，以找到更为直接的证据。

综上所述，脑机制研究揭示了阅读障碍书写过程中小脑与其它皮层脑区（额下回、颞枕区）功能连接的异常(Richards et al., 2015)，支持了阅读障碍的小脑理论假设。同时，通过建立小脑与书写缺陷这一行为表现的联系，也为解释小脑缺陷如何导致阅读障碍读写困难提供了实验证据。但是，阅读障碍书写缺陷的神经机制研究处于萌芽阶段，书写加工的不同成分与脑功能异常的对应关系尚不清楚。后续研究需要从脑区定位和连接的角度更加深入探究阅读障碍书写加工缺陷的脑功能与结构基础，揭示阅读障碍书写加工缺陷发生的阶段与特点，这将是阅读障碍书写加工缺陷的重要研究方向。当前，书写脑成像研究技术不断完善，例如磁共振兼容手写板的应用 (Planton, Longcamp, Péran, Démonet, & Jucla, 2017; Tam, Churchill, Strother, & Graham, 2011)，为推动阅读障碍书写脑成像研究提供了有力的技术支持。

3. 汉语阅读障碍书写加工研究

3.1 汉字书写特点

汉字与拼音文字存在巨大差异。首先，汉字具有独特的视觉特征。汉字的结构单元包括笔画和偏旁（部件）。笔画是汉字最小的结构单元，偏旁与部件由笔画组成。汉字包括独体字与合体字，独体字由笔画直接组成，合体字由不同的偏旁（部件）组合而成。可见，汉字的视觉结构相当复杂。其次，汉字的形-音对应关系复杂。与拼音文字不同，音节是汉语的语音单位，一个汉字对应一个音节。常用的音节（语音单位）只有大约 1300 个，但是常用的语素（语义单位）大约有 5000 个（尹斌庸，1984）。所以，汉语中存在大量的同音字，这些同音字有的字形相似，有的字形完全不同，形成了复杂的形-音对应关系。汉字的特点导致了汉字书写加工的特异性。例如，汉字的书写单元为偏旁（或部件），其视觉正字法与运动加工复杂度远远高于拼音文字中的字母 (Damian & Qu, 2017; Han, Zhang, Shu, & Bi, 2007; Zhang & Feng, 2017)。研究发现，与拼音文字不同，声旁一致性对汉字听写成绩没有影响（张大成, 张厚粲, 周晓林, &舒华等，1999）。脑成像研究也发现，汉字书写既涉及与拼音文字相同的脑区，包括左侧前运动区、左侧顶内沟 / 顶上沟、左侧颞下回后部（梭状回）与右侧小脑等区域，也涉及一些特异性脑区，比如，中文书写涉及右侧枕叶，这与汉字复杂的字形特征有关 (Cao & Perfetti, 2016; Cao et al., 2013; Yang et al., 2018; Yang et al., 2019)。此外，直接比较中英文书写加工还发现，汉字书写过程中左侧额中回激活更强 (Cao & Perfetti, 2016)。

3.2 汉字书写与阅读关系

由于汉字复杂的视觉特征以及形-音对应关系，书写成为了汉字习得的核心途径，对汉语阅读能力获得与发展至关重要 (Cao et al., 2013; Tan, Spinks, Eden, Perfetti, & Siok, 2005; Wang, McBride-Chang, & Chan, 2014)。通过书写，儿童可以学习如何将汉字解析为特定书写单元（笔画与部件），再将这些书写单元整合为一个完整的方块字形。这一解码过程发生在视觉-正字法层面，可以促进正字法意识的发展，从而帮助儿童建立形-音-义之间的联系，最终建立起高质量的词汇长时记忆表征系统。对汉语母语儿童的研究发现，在排除了其它相关因素影响后，汉字抄写速度与汉语阅读能力显著相关 (Tan et al., 2005; Ying, Mcbride-Chang, & Chan, 2014)。对汉语二语者的研究也证实，相对于纯粹语音或字形教学，汉字抄写教学能够更好地帮助英语母语者学习汉字 (Cao et al.,

2013; Guan, Perfetti, & Meng, 2015)。研究还发现，在信息化时代背景下，由于汉字书写频率大幅降低，可能导致汉语阅读困难比例上升 (Tan, Xu, Chang, & Siok, 2013)。鉴于书写与阅读的密切关系，研究汉语阅读障碍的书写加工缺陷及其与阅读困难的关系，将对汉语阅读障碍的诊断与矫治起到非常重要的指导作用。

3.3 汉语阅读障碍书写加工研究

3.3.1 行为研究

目前，汉语阅读障碍的主要认知缺陷尚未形成统一认识。语音加工缺陷 (Cao et al., 2017; Su et al., 2018)、正字法加工缺陷 (Ho, Chan, Lee, Tsang, & Luan, 2004; Liu et al., 2012)与语素意识缺陷 (Liu et al., 2013; Shu, McBride-Chang, Wu, & Liu, 2006) 都是汉语阅读障碍儿童的重要行为表现。还有研究者指出，汉语阅读障碍的书写/拼写困难可能比阅读困难本身更为严重(Leong, Cheng, & Lam, 2000)。在中国香港地区，阅读障碍的诊断标准中就包括了书写困难（Education Department of HKSAR，2002）。

香港地区一项大样本研究（N=1235）显示，汉语阅读障碍儿童听写得分显著低于常模分数(Chan, Ho, Tsang, Lee, & Chung, 2006)。另一项研究比较了香港地区 2-6 年级阅读障碍儿童与同年龄控制组的汉字抄写成绩。结果发现，相比正常儿童，所有年级的汉语阅读障碍儿童都表现出书写速度慢、准确性差、字体偏大、变异性更大且笔画错误多等特点。汉字书写的速度与准确性对不同年级阅读障碍儿童的区分度高达 70%。作者认为，阅读障碍儿童书写困难由精细运动与视知觉记忆缺陷导致 (Lam et al., 2011)。但是，McBride-Chang 等（2011）认为，采用汉字或者熟悉图形作为书写材料，被试反应会受到经验的影响。因此，阅读障碍儿童与控制组书写加工差异，可能与刺激材料的熟悉程度有关。为控制这一因素，McBride-Chang 等（2011）采用无意义字符作为书写材料。结果发现，抄写三种无意义字符（韩语、越南语与希伯来语）的成绩能够很好地区分汉语阅读障碍儿童与正常儿童。这表明，抄写能力（视觉-运动）本身也是汉语阅读障碍重要的影响因素之一(McBride-Chang et al., 2011)。近期另一项研究支持这一观点，它发现无意义字符抄写能力对汉语阅读障碍有很好的鉴别能力，却不能区别英语阅读障碍与正常儿童(Kalindi et al., 2015)。这

表明，汉字书写对汉语阅读障碍确实有特殊的意义。前面几项研究都是针对香港地区的汉语阅读障碍儿童。最近一项中国大陆地区（北京）阅读障碍儿童的研究同样发现，汉语阅读障碍儿童在汉字与符号的抄写速度比同年龄控制组儿童慢 (Meng, Wydell, & Bi, 2018)。可以看出，书写加工缺陷广泛存在于汉语阅读障碍儿童中，既表现在语言层面的汉字抄写上，也表现在非语言层面的符号抄写上。而且，与拼音文字研究不同的，汉语阅读障碍在非言语符号书写中的缺陷更多地涉及基本的视觉-运动整合加工缺陷(Meng, Wydell, & Bi, 2018)。但是，这种一般性的整合加工缺陷与汉语阅读障碍有何种内在联系，尚不清楚。

3.3.2 神经机制研究

目前，尚未见到有针对汉语阅读障碍的书写加工缺陷开展的神经机制研究。前期脑成像研究发现，汉语阅读障碍儿童在左侧额中回(Siok, Niu, Jin, Perfetti, & Tan, 2008)、双侧颞枕区(Liu et al., 2012; Qi et al., 2016)与小脑 (Feng et al., 2017; Yang, Yang, Chen, Zhang, & Bi, 2016; Yang, Bi, Long, & Tao, 2013; Yang & Bi, 2011) 表现出功能与结构异常，而这些脑区都与书写加工密切相关(Planton et al., 2013) 。因此，汉语阅读障碍书写加工缺陷的神经基础，特别是额中回、双侧颞枕区与小脑的异常与书写加工缺陷之间的关系，非常值得进一步深入研究，这也是揭示汉语阅读障碍特异性脑机制的重要机会。

4. 总结与未来研究方向

在拼音文字与汉语的阅读障碍中，都广泛存在书写加工缺陷。拼音文字研究发现，阅读障碍的书写加工缺陷主要表现在正字法通达方面，即书写的中央过程。相比拼音文字，汉字书写加工更为复杂，与阅读能力关系也更为密切。行为研究报道了汉语阅读障碍者同时在语言（汉字）或非语言（符号）两个层面都表现出显著的书写困难，提示在中央与外周过程都存在加工缺陷。但是由于缺乏系统研究，特别是脑机制研究，导致我们对汉语阅读障碍书写缺陷的认识停留在现象层面，许多科学问题亟待解决。未来研究可以从如下几个方面入手：

1）通过同时操纵中央过程与外周过程因素，系统探查汉语阅读障碍书写的中央过程（正字法通达）与外周过程（运动执行）的加工缺陷，明确书写缺陷的内在机制，并考察其与阅读加工困难的关系。

2）书写字形提取过程中，正字法工作记忆（orthographic working memory）起着重要作用，负责暂时保持字形信息，为运动编码与输出做准备，起到连接中央过程与外周过程的中介作用 (Rapp, Purcell, Hillis, Capasso, & Miceli, 2015)。而且，脑成像研究发现，正字法工作记忆的大脑表征存在语言差异：拼音文字位于额上沟与顶上小叶(Rapp & Dufor, 2011)，而汉语位于左侧额中回与角回(Chen, Chang, Chen, Lin, & Wu, 2016)。但是，以往阅读障碍书写研究缺乏对这一因素的考察，后续研究可以考虑从正字法工作记忆的角度，研究汉语阅读障碍书写加工缺陷的特异性脑机制。

3）采用脑成像技术，考察阅读障碍书写加工的脑激活与功能连接。鉴于书写加工复杂性，同时涉及语言与运动加工，脑功能连接的研究将是探究阅读障碍书写缺陷机制的重要手段。同时，引入磁共振兼容的数字手写板，实时记录脑扫描过程中的书写行为反应，建立行为-脑活动之间的关系，在更加贴近真实书写行为的状态下考察神经机制，提高研究方法的生态效度。

4）以往研究发现，成人与儿童阅读障碍书写缺陷存在一定差异。但是，目前尚无研究直接考察阅读障碍书写缺陷的发展变化及其神经机制。后续研究，特别是纵向追踪研究十分必要。

5）阅读障碍儿童的书写困难如何有效矫正，书写训练能否有效地促进阅读障碍者的阅读能力，是重要的研究问题。比如，相对于其它形式的阅读训练，书写训练在汉语阅读障碍的矫正中具有何种独特作用，以及这种作用背后的认知神经机制是什么？如果要把书写纳入汉语阅读障碍的诊治方案中，这些都是必须要回答的问题。

从以上几个方面入手，系统开展汉语阅读障碍的书写加工研究，将丰富与发展汉语阅读障碍的特色理论，同时为相关诊治提供指导。

参考文献

王成, 尤文平, 张清芳. (2012). 书写产生过程的认知机制. 心理科学进展, 20(10), 1560-1572.

吴思娜.(2004). 阅读障碍的亚型研究. 北京师范大学博士论文.

尹斌庸. (1984). 汉语语素定量研究.中国语文, (5)

张承芬, 张景焕, 殷荣生, 周静, 常淑敏. (1996). 关于我国学生汉语阅读困难的研究. 心理科学, (4), 222-226.

张大成, 张厚粲, 周晓林, 舒华.（1999）. 听写任务下的字词加工. 语言文字应用，29，67 70.

Abbott, R. D., Berninger, V. W., & Fayol, M. (2010). Longitudinal relationships of levels of language in writing and between writing and reading in grades 1 to 7. *Journal of Educational Psychology, 102*(2), 281.

Afonso, O., Suárez-Coalla, P., & Cuetos, F. (2015). Spelling impairments in Spanish dyslexic adults. *Frontiers in Psychology, 6*, 466.

Angelelli, P., Notarnicola, A., Judica, A., Zoccolotti, P., & Luzzatti, C. (2010). Spelling impairments in Italian dyslexic children: Phenomenological changes in primary school. *Cortex, 46*(10), 1299-1311.

Baldo, J. V., Kacinik, N., Ludy, C., Paulraj, S., Moncrief, A., Piai, V., . . . Dronkers, N. F. (2018). Voxel-based lesion analysis of brain regions underlying reading and writing. *Neuropsychologia, 115*, 51-59.

Berninger, V. W., Nielsen, K. H., Abbott, R. D., Wijsman, E., & Raskind, W. (2008). Writing problems in developmental dyslexia: Under-recognized and under-treated. *Journal of School Psychology, 46*(1), 1-21.

Berninger, V. W., Richards, T. L., & Abbott, R. D. (2015). Differential diagnosis of dysgraphia, dyslexia, and OWL LD: Behavioral and neuroimaging evidence. *Reading and Writing, 28*(8), 1119-1153.

Bonin, P., Peereman, R., & Fayol, M. (2001). Do phonological codes constrain the selection of orthographic codes in written picture naming? *Journal of Memory and Language, 45*(4), 688-720.

Cao, F., & Perfetti, C. A. (2016). Neural Signatures of the Reading-Writing Connection: Greater Involvement of Writing in Chinese Reading than English Reading. *PloS One, 11*(12), e0168414.

Cao, F., Vu, M., Chan, L., Ho, D., Lawrence, J. M., Harris, L. N., Perfetti, C. A. (2013). Writing affects the brain network of reading in Chinese: A functional magnetic resonance imaging study. *Human Brain Mapping, 34*(7), 1670-1684.

Cao, F., Yan, X., Wang, Z., Liu, Y., Wang, J., Spray, G. J., & Deng, Y. (2017). Neural signatures of phonological deficits in Chinese developmental dyslexia. *Neuroimage, 146*, 301-311.

Chan, D. W., Ho, C. S.-H., Tsang, S.-M., Lee, S.-H., & Chung, K. K. (2006). Exploring the reading–writing connection in Chinese children with dyslexia in Hong Kong. *Reading and Writing, 19*(6), 543-561.

Chen, H.-Y., Chang, E. C., Chen, S. H., Lin, Y.-C., & Wu, D. H. (2016). Functional and anatomical dissociation between the orthographic lexicon and the orthographic buffer revealed in reading and writing Chinese characters by fMRI. *Neuroimage, 129*, 105-116.

Connelly, V., Campbell, S., MacLean, M., & Barnes, J. (2006). Contribution of lower order skills to the written composition of college students with and without dyslexia. *Developmental Neuropsychology, 29*(1), 175-196.

Damian, M. F., & Qu, Q. (2017). Exploring the role of logographemes in Chinese handwritten word production. *Reading & Writing*(6), 1-27.

Feng, X., Li, L., Zhang, M., Yang, X., Tian, M., Xie, W., Meng, X. (2017). Dyslexic Children Show Atypical Cerebellar Activation and Cerebro-Cerebellar Functional Connectivity in Orthographic and Phonological Processing. *Cerebellum, 16*(2), 1-12.

Goswami, U. (2011). A temporal sampling framework for developmental dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences, 15*(1), 3-10.

Gregg, N., Coleman, C., Davis, M., & Chalk, J. C. (2007). Timed essay writing implications for high-stakes tests. *Journal of Learning Disabilities, 40*(4), 306-318.

Guan, C. Q., Perfetti, C. A., & Meng, W. (2015). Writing quality predicts Chinese learning. *Reading & Writing, 28*(6), 763-795.

Han, Z., Zhang, Y., Shu, H., & Bi, Y. (2007). The orthographic buffer in writing Chinese characters: Evidence from a dysgraphic patient. *Cognitive Neuropsychology, 24*(4), 431-450.

Ho, C. S.-H., Chan, D. W.-O., Lee, S.-H., Tsang, S.-M., & Luan, V. H. (2004). Cognitive profiling and preliminary subtyping in Chinese developmental dyslexia. *Cognition, 91*(1), 43-75.

Kalindi, S. C., McBride, C., Tong, X., Wong, N. L. Y., Chung, K. H. K., & Lee, C.-Y. (2015). Beyond phonological and morphological processing: pure copying as a marker of dyslexia in Chinese but not poor reading of English. *Annals of Dyslexia, 65*(2), 53-68.

Kandel, S., Lassus-Sangosse, D., Grosjacques, G., & Perret, C. (2017). The impact of developmental dyslexia and dysgraphia on movement production during word writing. *Cognitive Neuropsychology, 34*(3-4), 219-251.

Kandel, S., Peereman, R., & Ghimenton, A. (2013). Further evidence for the interaction of central and peripheral processes: the impact of double letters in writing English words. *Frontiers in Psychology, 4*, 729.

Kandel, S., & Perret, C. (2015). How does the interaction between spelling and motor processes build up during writing acquisition? *Cognition, 136*(136), 325-336.

Lam, S. S., Au, R. K., Leung, H. W., & Li-Tsang, C. W. (2011). Chinese handwriting performance of primary school children with dyslexia. *Research in Developmental Disabilities, 32*(5), 1745-1756.

Leong, C. K., Cheng, P.-W., & Lam, C. C. (2000). Exploring reading-spelling connection as locus of dyslexia in Chinese. *Annals of Dyslexia, 50*(1), 239-259.

Liu, L., Tao, R., Wang, W., You, W., Peng, D., & Booth, J. R. (2013). Chinese dyslexics show neural differences in morphological processing. *Developmental Cognitive Neuroscience, 6*, 40-50.

Liu, L., Wang, W., You, W., Li, Y., Awati, N., Zhao, X., . . . Peng, D. (2012). Similar alterations in brain

function for phonological and semantic processing to visual characters in Chinese dyslexia. *Neuropsychologia, 50*(9), 2224-2232.

Longcamp, M., Zerbato-Poudou, M.-T., & Velay, J.-L. (2005). The influence of writing practice on letter recognition in preschool children: A comparison between handwriting and typing. *Acta Psychologica, 119*(1), 67-79.

Martlew, M. (1992). Handwriting and spelling: dyslexic children's abilities compared with children of the same chronological age and younger children of the same spelling level. *British Journal of Educational Psychology, 62*(3), 375–390.

McBride-Chang, C., Chung, K. K., & Tong, X. (2011). Copying skills in relation to word reading and writing in Chinese children with and without dyslexia. *Journal of Experimental Child Psychology, 110*(3), 422-433.

Meng, Z.-L., Wydell, T. N., & Bi, H.-Y. (2018). Visual-motor integration and reading Chinese in children with/without dyslexia. *Reading & Writing*, 1-18.

Nakamura, K., Kuo, W.-J., Pegado, F., Cohen, L., Tzeng, O. J., & Dehaene, S. (2012). Universal brain systems for recognizing word shapes and handwriting gestures during reading. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 109*(50), 20762-20767.

Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2011). Dyslexia, dysgraphia, procedural learning and the cerebellum. *Cortex, 47*(1), 117-127.

Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., & Dean, P. (2001). Developmental dyslexia: the cerebellar deficit hypothesis. *Trends in Neurosciences, 24*(9), 508-511.

Pagliarini, E., Guasti, M. T., Toneatto, C., Granocchio, E., Riva, F., Sarti, D., . . . Stucchi, N. (2015). Dyslexic children fail to comply with the rhythmic constraints of handwriting. *Human Movement Science, 42*, 161-182.

Pattamadilok, C., Ponz, A., Planton, S., & Bonnard, M. (2016). Contribution of writing to reading: Dissociation between cognitive and motor process in the left dorsal premotor cortex. *Human Brain Mapping*, *37(4),* 1531-1543

Planton, S., Jucla, M., Roux, F.-E., & Démonet, J.-F. (2013). The "handwriting brain": a meta-analysis of neuroimaging studies of motor versus orthographic processes. *Cortex, 49*(10), 2772-2787.

Planton, S., Longcamp, M., Péran, P., Démonet, J.-F., & Jucla, M. (2017). How specialized are writing-specific brain regions? An fMRI study of writing, drawing and oral spelling. *Cortex*, 88, 66-80.

Purcell, J., Turkeltaub, P. E., Eden, G. F., & Rapp, B. (2011). Examining the central and peripheral processes of written word production through meta-analysis. *Frontiers in Psychology, 2*, 239.

Purcell, J. J., Shea, J., & Rapp, B. (2014). Beyond the visual word form area: The orthography–semantics interface in spelling and reading. *Cognitive Neuropsychology, 31*(5-6), 482-510.

Purcell, J. J., Jiang, X., & Eden, G. F. (2017). Shared orthographic neuronal representations for spelling and reading. *Neuroimage, 147*, 554-567.

Qi, T., Gu, B., Ding, G., Gong, G., Lu, C., Peng, D., . . . Liu, L. (2016). More bilateral, more anterior: Alterations of brain organization in the large-scale structural network in Chinese dyslexia. *Neuroimage, 124*, 63-74.

Rapp, B., & Dufor, O. (2011). The neurotopography of written word production: an fMRI investigation of the distribution of sensitivity to length and frequency. *Journal of Cognitive Neuroscience, 23*(12), 4067-4081.

Rapp, B., & Lipka, K. (2011). The literate brain: the relationship between spelling and reading. *Journal of Cognitive Neuroscience, 23*(5), 1180-1197.

Rapp, B., Purcell, J., Hillis, A. E., Capasso, R., & Miceli, G. (2015). Neural bases of orthographic long-term memory and working memory in dysgraphia. *Brain, 139*(2), 588-604.

Richards, T., Grabowski, T., Boord, P., Yagle, K., Askren, M., Mestre, Z., . . . Nagy, W. (2015). Contrasting brain patterns of writing-related DTI parameters, fMRI connectivity, and DTI–fMRI connectivity correlations in children with and without dysgraphia or dyslexia. *NeuroImage: Clinical, 8*, 408-421.

Roux, S., Mckeeff, T. J., Grosjacques, G., Afonso, O., & Kandel, S. (2013). The interaction between central and peripheral processes in handwriting production. *Cognition, 127*(2), 235-241.

Shaywitz, S. E. (1998). Dyslexia. *New England Journal of Medicine, 338*(5), 307-312.

Shu, H., McBride-Chang, C., Wu, S., & Liu, H. (2006). Understanding chinese developmental dyslexia: Morphological awareness as a core cognitive construct. *Journal of Educational Psychology, 98*(1), 122.

Siok, W. T., Niu, Z., Jin, Z., Perfetti, C. A., & Tan, L. H. (2008). A structural–functional basis for dyslexia in the cortex of Chinese readers. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 105*(14), 5561-5566.

Stein, J., Richardson, A., & Fowler, M. (2000). Monocular occlusion can improve binocular control and reading in dyslexics. *Brain, 123*(1), 164-170.

Su, M., Zhao, J., Schotten, M. T. D., Zhou, W., Gong, G., Ramus, F., & Shu, H. (2018). Alterations in white matter pathways underlying phonological and morphological processing in Chinese developmental dyslexia. *Developmental Cognitive Neuroscience, 31*, 11.

Sumner, E., Connelly, V., & Barnett, A. L. (2013). Children with dyslexia are slow writers because they pause more often and not because they are slow at handwriting execution. *Reading & Writing, 26*(6), 991-1008.

Sumner, E., Connelly, V., & Barnett, A. L. (2014). The influence of spelling ability on handwriting production: children with and without dyslexia. *Journal of Experimental Psychology Learning Memory & Cognition, 40*(5), 1441-1447.

Tam, F., Churchill, N. W., Strother, S. C., & Graham, S. J. (2011). A new tablet for writing and drawing during functional MRI. Human Brain Mapping, 32(2), 240-248.

Tan, L. H., Spinks, J. A., Eden, G. F., Perfetti, C. A., & Siok, W. T. (2005). Reading depends on writing, in Chinese. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 102*(24), 8781-8785.

Tan, L. H., Xu, M., Chang, C. Q., & Siok, W. T. (2013). China's language input system in the digital age affects children's reading development. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 110*(3), 1119-1123.

Van der Mark, S., Bucher, K., Maurer, U., Schulz, E., Brem, S., Buckelmüller, J., . . . Martin, E. (2009).

Children with dyslexia lack multiple specializations along the visual word-form (VWF) system. *Neuroimage, 47*(4), 1940-1949.

van der Mark, S., Klaver, P., Bucher, K., Maurer, U., Schulz, E., Brem, S., . . . Brandeis, D. (2011). The left occipitotemporal system in reading: disruption of focal fMRI connectivity to left inferior frontal and inferior parietal language areas in children with dyslexia. *Neuroimage, 54*(3), 2426-2436.

Wang, Y., McBride-Chang, C., & Chan, S. F. (2014). Correlates of Chinese kindergarteners' word reading and writing: the unique role of copying skills? *Reading &Writing, 27*(7), 1281-1302.

Yang, Y.-H., Yang, Y., Chen, B.-G., Zhang, Y.-W., & Bi, H.-Y. (2016). Anomalous cerebellar anatomy in Chinese children with dyslexia. *Frontiers in Psychology, 7*.

Yang, Y., Bi, H.-Y., Long, Z.-Y., & Tao, S. (2013). Evidence for cerebellar dysfunction in Chinese children with developmental dyslexia: an fMRI study. *International Journal of Neuroscience, 123*(5), 300-310.

Yang, Y., & Bi, H. Y. (2011). Unilateral implicit motor learning deficit in developmental dyslexia. *International Journal of Psychology, 46*(1), 1–8.

Yang, Y., Zhang, J., Meng, Z.-l., Qin, L., Liu, Y., & Bi, H.-Y. (2018). Neural correlates of orthographic access in Mandarin Chinese writing: an fMRI study of the word-frequency effect. *Frontiers in Behavioral Neuroscience, 12*, 288.

Yang, Y., Zuo, Z., Tam, F., Graham, S. J., Tao, R., Wang, N., & Bi, H.-Y. (2019). Brain activation and functional connectivity during Chinese writing: An fMRI study. *Journal of Neurolinguistics*, 51, 199-211.

Ying, W., Mcbride-Chang, C., & Chan, S. F. (2014). Correlates of Chinese kindergarteners' word reading and writing: the unique role of copying skills? *Reading & Writing, 27*(7), 1281-1302.

Zhang, Q., & Feng, C. (2017). The interaction between central and peripheral processing in Chinese handwritten production: Evidence from the effect of lexicality and radical complexity. *Frontiers in Psychology, 8*, 334.

Writing deficit in developmental dyslexia and its neural mechanisms

Abstract

Developmental dyslexia is a major type of learning disabilities. It severely hinders the development of cognition, emotion and social adaptability. Writing is closely related to reading， and individuals with dyslexia usually manifest writing difficulty. At the behavioral level, dyslexics exhibit impaired writing quality, speed and pauses, compared to typical readers, involving the central and peripheral components of writing. At the neural level, neuroimaging studies demonstrated that dyslexics showed altered functional and structural connectivity in brain regions associated with linguistic and motor processes of writing. Writing is greatly related to reading in

Chinese. The study of writing deficit would have values for developing the unique diagnosis and treatment strategies for Chinese dyslexia.

Key words developmental dyslexia, Chinese, writing, neural mechanisms